

薛艳, 刘杰, 梅世蓉, 宋治平. 2009. 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前地震活动异常特征. 地震学报, **31**(6): 606-619.  
Xue Yan, Liu Jie, Mei Shirong, Song Zhiping. 2009. Characteristics of seismic activity before 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(6): 606-619.

## 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前 地震活动异常特征<sup>\*</sup>

薛 艳<sup>1,2),\*</sup> 刘 杰<sup>2)</sup> 梅世蓉<sup>3)</sup> 宋治平<sup>4)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

4) 中国上海 200062 上海市地震局

**摘要** 分析了汶川地震前地震活动时空演化特征. 结果表明: ① 汶川地震前 38 a 龙门山断裂带及其附近形成 5 级地震背景空区, 震前 6.5 a 形成  $M_L4.0$  地震孕震空区, 震前 1 a 孕震空区内部及其两端相继发生多次  $M_L4.0-5.0$  地震, 空区缩小; ② 中国大陆西部及邻区 2001 年以来处于大震活跃时段, 而中国大陆内部地震活动水平非常低, 出现非常显著的 7 级、6 级和 5 级地震平静; ③ 南北地震带 7 级以上地震在时间上具有准周期特征, 空间上存在由南向北迁移的特点, 汶川地震的发生符合这一规律; ④ 1988 年以来南北地震带中段为 7 级地震空段, 汶川地震就发生该空段内; ⑤ 2003 年云南大姚地震后, 南北地震带地震活动显著增强, 且在中、南段形成 4.6 级以上地震环形分布, 四川及其附近表现为异常平静, 同时震群活动显著, 且在 4.6 级地震平静区内形成震群空区, 汶川地震就发生震群空区的边缘, 震前 8 个月, 震群频度出现高值异常; ⑥ 汶川地震前 7 个月, 青藏块体大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静 103 d, 2008 年 1 月 13 日以后平静区逐渐解体, 至汶川地震前 4 级地震平静区缩小到巴颜喀拉地块, 汶川地震就发生在巴颜喀拉地块的东边界带上, 汶川地震前 3 个多月, 孕震空区内部出现 NW 走向的 3 级地震条带, 与龙门山断裂带斜交.

**关键词** 汶川地震 背景空区 孕震空区 震群 地震条带 地震平静

**文章编号**: 0253-3782(2009)06-0606-14

**中图分类号**: P315.5

**文献标识码**: A

## Characteristics of seismic activity before 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Xue Yan<sup>1,2),\*</sup> Liu Jie<sup>2)</sup> Mei Shirong<sup>3)</sup> Song Zhiping<sup>4)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

4) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

**Abstract**: The spatio-temporal evolution characteristics of seismic activity before

\* 基金项目 国家“973”项目(2008CB425704, 2004CB418406) 资助. 中国地震局地球物理研究所论著 09AC1020.

收稿日期 2009-02-17 收到初稿, 2009-04-29 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: xueyan5619@seis.ac.cn

2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake are studied. Some results are as follows: ① A background gap of  $M \geq 5.0$  earthquakes formed in the area of Longmenshan fault zone and its vicinity 38 years before the 2008 Wenchuan earthquake. A seismogenic gap of  $M_L \geq 4.0$  earthquakes appeared in the same area 6.5 years prior to the Wenchuan earthquake. It is noticed that one year before the Wenchuan earthquake some particular earthquakes with  $M_L 4.0-5.0$  occurred successively in Longmenshan fault zone and its two end regions, and the original gap was reduced. ② Western China mainland and its adjacent area has been in the seismically active period since 2001, while the inner land of China is seismically inactive, with remarkable quiescence of  $M \geq 7.0$ ,  $M \geq 6.0$  and  $M \geq 5.0$  earthquakes. ③ The activity of  $M \geq 7.0$  earthquakes in the South-North Seismic Zone showed temporally quasi-cyclic variation and spatial migration from south to north. The occurrence of the Wenchuan earthquake itself followed this feature. ④ A quiescence area of  $M \geq 7.0$  earthquakes formed in the middle and northern part of the South-North Seismic Zone since 1988 and the Wenchuan earthquake occurred in it. ⑤ The seismic activity obviously strengthened and a doughnut-shape pattern of  $M \geq 4.6$  earthquakes appeared in the middle and southern part of the South-North Seismic Zone after the 2003 Dayao, Yunnan, earthquake. Sichuan province and its vicinity in the middle of the doughnut-shape pattern were obviously quiescent. In the same time, earthquake swarms were often seen and showed heterogeneous temporal and spatial distribution. A swarm gap appeared in the quiet area of  $M 4.6$  earthquakes and the Wenchuan earthquake occurred just on the margin of the gap. Earthquake swarms occurred quite frequently during the 8 months before Wenchuan earthquake. ⑥ Quiescence of  $M_L \geq 4.0$  earthquakes appeared in Qinghai-Xizang block 7 months before Wenchuan earthquake and the quiescence state gradually disappeared since 13 January 2008. Before the Wenchuan earthquake the quiescence area reduced to the region of Bayankala block and the Wenchuan mainshock occurred just in eastern boundary zone of the block. A belt of  $M_L \geq 3.0$  earthquakes striking in NW-SE direction, which obliquely crosses to the Longmenshan fault zone, formed 3 months before the Wenchuan earthquake in the seismogenic gap.

**Key words:** Wenchuan earthquake; background gap; seismogenic gap; earthquake swarm; seismic belt; earthquake quiescence

## 引言

2008 年 5 月 12 日四川汶川( $30.95^\circ\text{N}$ ;  $103.40^\circ\text{E}$ )发生  $M_s8.0$  地震,震源深度 14 km (张勇等, 2008). 张勇等(2008)利用全球长周期台站的矩张量解及其最佳双力偶解,证明这次地震是以逆冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震. 这次地震释放的标量地震矩为  $4.4 \times 10^{21} \text{ N}\cdot\text{m}$ , 震级为  $M_w8.3$ , 地震破裂时间持续 60—80 s. 这次地震造成了 69 000 多人死亡, 18 000 多人失踪, 直接经济损失 8 451 亿元<sup>①</sup>. 面对巨大的人员伤亡和财产损失, 作为地震工作者, 我们痛心疾首. 痛定思痛后, 我们应该珍惜这次难得的 8 级大震震例, 认真

① 国家新闻办公室 9 月 4 日新闻发布会提供.

总结震前出现的异常现象，为巨大地震的预测寻找线索。

本文从地震活动性角度，系统总结了汶川地震前不同强度的地震在不同时段、不同区域的活动特点。研究中使用了中国历史地震目录(国家地震局震害防御司，1995；中国地震局震害防御司，1999)及中国地震台网中心 1988—2008 年整编的月报目录(<http://www.csndmc.ac.cn/newweb/>)。文中引用的活动地块和活动断层资料取自张培震等(2003)及邓起东等(2003)的研究结果。

1 龙门山地震带构造背景及地震活动

根据张培震等(2008)的研究结果，汶川地震发生在四川龙门山逆冲推覆断裂带上。该断裂带是青藏高原和华南地块的边界断裂带，经历了长期地质演化，具有十分复杂的结构和构造。晚新生代的构造变形主要集中在灌县—江油断裂(前山断裂)、映秀—北川断裂(中央断裂)和汶川—茂汶断裂(后山断裂)及相关褶皱(徐锡伟等，2005，2008；Densemores *et al*，2007)。汶川地震发生在映秀—北川断裂上，是龙门山逆冲推覆体向东南方向推挤并伴随顺时针剪切作用的结果。

龙门山断裂带晚第四纪构造活动速率很低。震前的 GPS 观测表明，横跨整个龙门山断裂带的滑动速率不超过约 2 mm/a，单条断裂的活动速率不超过约 1 mm/a，与地震地质研究结果和历史地震记录相一致。其特大地震的复发周期为 2000—6000 a。龙门山断裂带发育在破裂强度很大的变质岩体中，断裂带本身在剖面上呈“犁形”或“铲形”结构，有利于能量积累，形成破坏性巨大的地震。汶川特大地震具有低滑动速率、长复发周期和高破坏强度的特点。

历史地震活动显示，龙门山断裂带地震活动水平不高，有历史资料以来没有发生过 7 级地震，仅发生过 5 次 6 级以上地震，最大地震为 1654 年 4 月 21 日四川汶川 6.5 级地震。而其附近的岷江断裂带却非常活跃，发生过 4 次 7 级以上地震。

图 1 是龙门山地震带(包括龙门山断裂带和岷江断裂带)有历史记录以来的 5 级以上地震活动  $M-t$  图。由图 1 可见，如果考虑  $M \geq 6.5$  地震，该区可能存在两个活跃期；第一个活跃期大致为 1630—1748 年，持续 119 a，共发生 6.5 级以上地震 4 次，最大地震为 1713 年四川茂汶—叠溪 7 级地震。根据黄纬琼等(1994)的研究结果，龙门山地震带 1879 年以来  $M \geq 6.0$  地震资料基本完整，1931 年以来  $M \geq 5.0$  地震资料基本完整。可见，第一活跃期地震资料是不完整的。第二个活跃期从 1933 年开始，其中前 45 a(1933—1976 年)地震活动

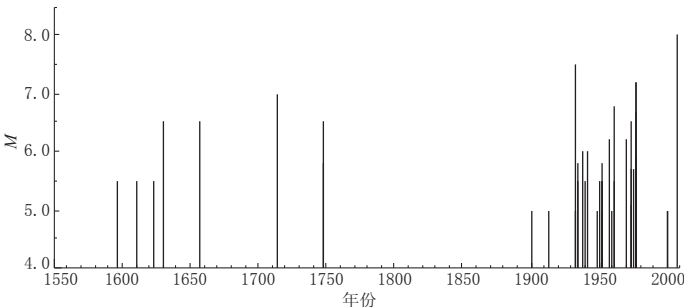


图 1 龙门山地震带  $M \geq 5.0$  地震活动  $M-t$  图

Fig. 1  $M-t$  plot of  $M \geq 5.0$  earthquakes in Longmenshan seismic belt

非常强烈，共发生  $M\geqslant 5.0$  地震 29 次，平均 1.6 a 发生 1 次，发生 7 级地震 3 次，分别为 1933 年 8 月 25 日茂汶—叠溪 7.5 级地震(震中烈度Ⅸ度)，1976 年 8 月 16 日松潘—平武 7.2 级和 8 月 23 日 7.2 级地震，随后 32 a(1977—2007 年)地震活动水平非常低，仅发生 1999 年 9 月 14 日四川绵竹 5.0 级和 1999 年 11 月 30 日四川安县 5.0 级地震，表明汶川地震前 32 a 龙门山地震带 5 级以上地震活动表现为活跃期内的异常平静(梅世蓉，1960)。

2 汶川地震前中国大陆及邻区强震活动特点

2.1 昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后中国大陆西部及邻区强震活动

图 2 是 1900 年以来中国大陆西部及邻区(大三角地区) $M\geqslant 7.8$  地震的  $M-t$  图，由图 2 可见，该区大震活动具有明显的活跃—平静交替性，2001 年昆仑山口西  $M_s8.1$  地震的发生打破了该区长达 31 a 的 7.8 级以上地震平静，同时打破了我国大陆地区 50 a 的 8 级地震平静，标志着大三角地区开始进入一个新的活跃时段，随后 2003 年俄、蒙、中交界 7.9 级和 2005 年巴基斯坦 7.8 级地震的相继发生进一步证实了这一点，2001 年以前该区共出现 3 个活跃时段，分别为 1902—1912 年、1920—1934 年和 1946—1957 年，每个活跃时段持续 10 余年，发生数次至十余次 7.8 级以上大震，汶川地震就发生在 2001 年开始的第 4 活跃时段。

中国大陆地区强震具有成组活动的特点(李钦祖等，1993，1994；傅征祥等，2005)，1900—2000 年我国大陆内部共发生 7 次 8 级大震，可分成 3 组(表 1)，组内最短时间间隔

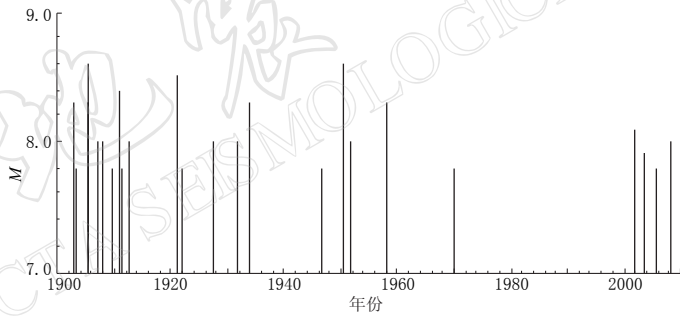


图 2 中国大陆西部及邻区  $M\geqslant 7.8$  地震活动  $M-t$  图  
Fig. 2  $M-t$  plot of  $M\geqslant 7.8$  earthquakes in western China and its adjacent regions

表 1 1900 年以来中国大陆  $M\geqslant 8.0$  地震及其时间间隔

Table 1 $M\geqslant 8.0$ earthquakes in China mainland region since 1900 and their occurrence time intervals				
序号	$M\geqslant 8.0$ 地震			组间地震间隔
	年-月-日	地点	震级	时间/月
1	1902-08	新疆阿图什	8.3	43
	1906-12	新疆沙湾	8.0	
	1920-12	宁夏海原	8.5	76
2	1927-05	甘肃古浪	8.0	50
	1931-08	新疆富蕴	8.0	
3	1950-08	西藏察隅	8.6	14
	1951-11	西藏当雄	8.0	
4	2001-11	青海昆仑山口西	8.1	77
	2008-05-12	四川汶川	8.0	

为 1 a, 最长间隔为 7 a. 汶川地震与昆仑山口西地震为第 4 组, 相隔时间近 7 a, 与 1920 年宁夏海原和 1927 年甘肃古浪地震相似.

2.2 1988 年以来中国大陆西部 7 级地震活动特点

1988 年以来中国大陆西部 7 级以上地震活动出现有序状态. 1988 年 1 月—1996 年 2 月地震活动主要集中在印度板块向欧亚带碰撞的东支点附近, 中国大陆呈西南强、西北弱

的特点(图 3 中的空心圆). 1996 年 3 月后, 地震活动格局有了显著变化, 7 级地震主要集中在印度板块向欧亚带碰撞的西支点附近, 并沿伸到了青藏块体西部, 其主体活动地区为昆仑山断裂带及其附近, 形成近 EW 走向、规模巨大的地震条带(图 3 中的灰色圆). 2000 年和 2003 年缅甸发生 2 次 7 级地震, 而南北带中段为 7 级地震空段(中国地震台网中心, 2007). 汶川地震就发生在该空段内(图 3 中的阴影圆).

我国大陆的南北地震带 7 级地震活动具有准周期特征, 每个活动阶段平均持续时间为 18 a 左右, 且每个活跃时段开始强度高, 然后逐渐衰减(中国地震台网中心, 2007; 图 4). 最近的一个活动阶段从 1988 年 11 月 6 日云南澜沧—耿马 7.6 级、7.2 级地震开始, 到 2007 年底已经发生了 26 次 6 级以上地震、5 次 7 级地震, 最大地震为 7.6 级, 持续时间为 20 a, 与平均 18 a 的活动周期相当. 汶川地震的发生结束了南北地震带自 1996 年 2 月 3 日云南丽江 7.0 级地震后 12 a 的 7 级地震平静, 开始了一个新的强震活动阶段.

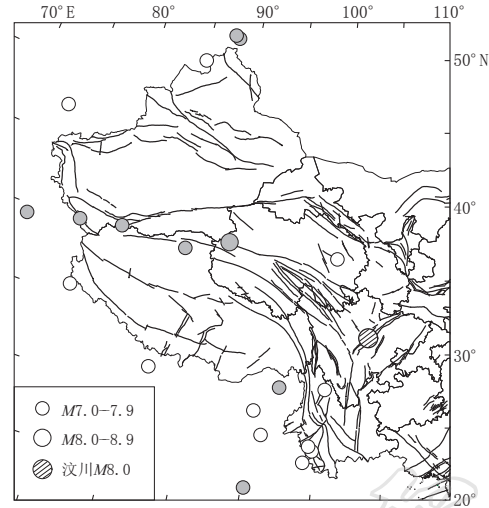


图 3 中国大陆西部及邻区 1988 年以来  $M \geq 7.0$  地震震中分布

空心圆表示 1988 年 1 月 1 日—1996 年 2 月 29 日地震; 灰色圆表示 1996 年 3 月 1 日—2008 年 5 月 11 日地震

Fig. 3  $M \geq 7.0$  earthquakes in western China and its adjacent regions since 1988  
Hollow circles: earthquakes during 1 Jan. 1988 to 29 Feb. 1996; grey circles: earthquakes during 1 Mar. 1996 to 11 May 2008

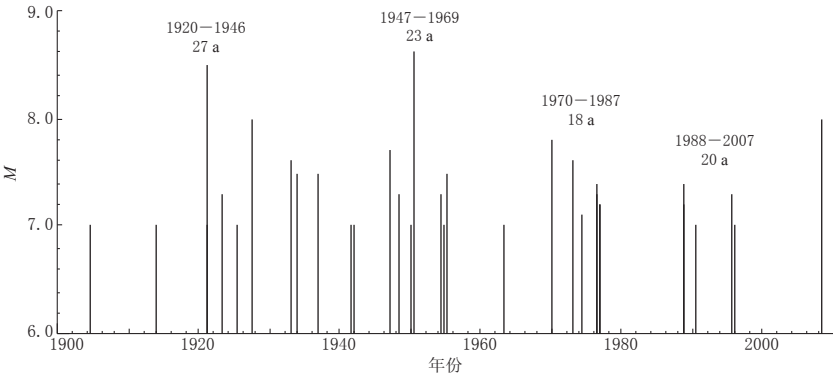


图 4 南北地震带 7 级以上地震活动  $M-t$  图(引自中国地震台网中心, 2007)

Fig. 4  $M-t$  plot of  $M \geq 7.0$  earthquakes in North-South Seismic Zone

南北地震带南、中、北三段 7 级以上地震成组活动格局呈现出大震自南而北成组推进或发生的特点(中国地震台网中心, 2007). 自 20 世纪以来, 已经历了 3 期自南向北推进. 1988 年开始的第四期在南段及  $27^{\circ}\text{N}$  线附近分别发生了 1988 年云南澜沧—耿马 7.4 级、7.2 级地震和 1995 年云南孟连 7.3 级和 1996 年云南丽江 7.0 级地震. 由此推断, 在第四期中南北带中、北段存在发生 7 级地震的可能. 汶川地震的发生符合上述规律.

3 汶川地震前中国大陆中强地震活动特点

3.1 汶川地震前中国大陆显著的 6 级、5 级地震平静

2005 年 4 月 9 日—2007 年 5 月 4 日中国大陆 6 级以上地震平静 756 d, 为 1900 年以来最长时间的平静现象(图 5). 1900 年以来大陆 6 级以上浅源地震平静超过 500 d 的情况出现过 5 次. 前 4 次平静打破后 1 a, 有 3 次大陆地区发生了 7 级以上地震, 另一次虽然大陆未发生 7 级地震, 但距我国边境约 300 km 处发生 1957 年 12 月 4 日蒙古 8.3 级大震(中国地震台网中心, 2007). 2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级和 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震发生在我国大陆地区长时间的 6 级地震平静结束后的 1 a 时间.

6 级地震平静结束后, 2007 年 5—7 月中国大陆出现一组中强地震活动. 但 2007 年 7 月 20 日—2008 年 1 月 8 日, 中国大陆 5 级以上地震出现了 172 d 的突出平静(图 5). 1950 年以来中国大陆 5 级以上地震平静超过 130 d 的现象仅有 8 次, 前 7 次中有 4 次在其后 1 a

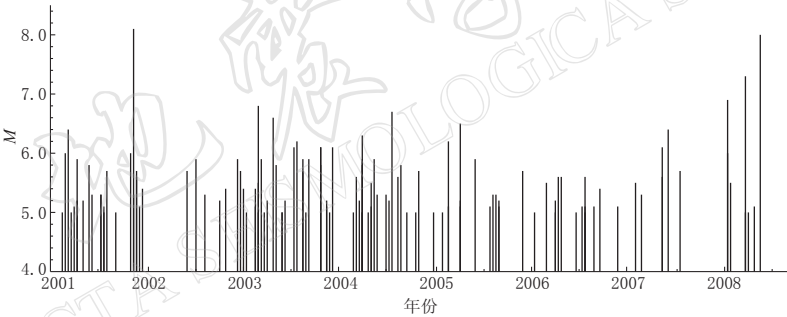


图 5 2001 年以来中国大陆  $M \geq 5.0$  浅源地震  $M-t$  图

Fig. 5.  $M-t$  plot of  $M \geq 5.0$  shallow earthquakes in China mainland region since 2001

发生 7 级地震(表 2). 值得注意的是 7 次平静现象中有 6 次是被 5.3—6.3 级地震打破, 其后 1 a 内有 3 次发生 7 级地震, 但强度没有达到 7.5 级. 只有渤海地震前的 156 d 平静直接被渤海 7.4 级打破, 其后半年内发生了云南通海 7.8 级大震. 2007 年出现的 5 级地震平静被 2008 年 1 月 9 日改则 6.9 级地震打破, 其后短短的 4 个月接连发生了于田 7.3 级和汶川 8.0 级地震.

另外, 2007 年中国大陆地区仅发生 6 次 5 级以上地震, 为 1950 年以来的最低年频度(不含余震). 据统计, 1950 年以来我国大陆地区共出现 4 次 5 级以上地震年频度位于 1.5 倍均方差外的现象, 分别为 1968 年(8 次)、1984 年(7 次)、2002 年(7 次)和 2007 年(5 次). 前 3 次低频度年后 1 a 内, 中国大陆地区及边境地区均发生了 7 级以上地震, 分别为 1969 年渤海 7.4 级、1985 年新疆乌恰 7.4 级和 2003 年中、俄、蒙交界 7.9 级地震.

以上分析表明, 2001 年昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后, 我国大陆地区显著的 7 级、6 级、5 级地震平静和 2007 年的 5 级地震低频度现象, 实际上反映了 2001 年以来大陆地区地震活

表 2 1950 年以来中国大陆  $M \geq 5$  浅源地震平静 130 d 以上统计表

Table 2 Statistics on the quiet periods of  $M \geq 5.0$  earthquakes with quiescence time beyond 130 days in China mainland region

序号	平静时段	持续天数	打破平静地震	平静打破后 1 a 地震状态
1	1968-05-15—1968-12-22	221	青海化隆西 5.4 级	1969-07-18 渤海 7.4 级
2	1969-02-12—1969-07-18	156	渤海 7.4 级	1970-01-05 云南通海 7.8 级
3	1978-10-08—1979-03-02	145	安徽固镇 5.3 级	无
4	1983-06-29—1983-11-06	130	青海乌兰乌拉湖 6.0 级	无
5	1984-05-21—1984-11-23	186	宁夏灵武 5.3 级	1985-08-23 新疆乌恰 7.1 级
6	1994-02-16—1994-06-30	133	青海唐古拉山 6.3 级	1995-07-12 云南孟连 7.3 级
7	2001-12-08—2002-06-04	178	西藏普兰 5.7 级	无
8	2007-07-20—2008-01-08	172	西藏仲巴 6.9 级	2008-03-21 新疆于田 7.3 级 2008-05-12 四川汶川 8.0 级

动水平逐渐降低,到了 2007 年已经达到了最低水平,之后发生了于田 7.3 级和汶川  $M_s8.0$  地震.

3.2 2001 年昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后青藏块体 5 级左右地震活动演化特征

图 6a, b 分别为 2001 年昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后至 2003 年 7 月 21 日云南大姚 6.2 级地震前和大姚地震后至汶川地震前青藏块体  $M \geq 4.6$  地震震中分布图. 由图 6 可见,昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后 1 年 8 个月,青藏块体 4.6 级以上地震基本受这次 8.1 级地震的影响,主要集中在它的余震区及其附近,而南北地震带活动水平非常弱,仅发生了 2002 年 8 月 8 日四川新龙 5.3 级地震(图 6a).

2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震后南北地震带中等以上地震活动显著增强,北至甘肃岷县、青海玛曲,南抵滇、缅交界,西达青海玉树、西藏波密,共发生 22 次 4.6 级以上地震. 其中 6 级以上地震 3 次,最大地震为 2007 年 6 月 3 日云南宁洱 6.4 级地震. 这些地震空间分布非常不均匀,其中滇西至川滇交界东部的地震密集成带,而四川绝大部分地区和滇、藏、缅交界地区地震表现为异常平静,即形成了一个近 NS 走向的中等以上地震活动环形分布区(梅世蓉等, 1996). 2008 年 2 月 27 日平静区内发生四川康定 4.6 级地震,打破了该区长达 4.5 a 的地震平静. 该地震距离汶川地震约 170 km,具有信号震意义(王俊国等, 2004).

图 6b 所示平静区里主要发育有龙门山断裂、鲜水河、安宁河、则木河断裂及三江断裂等. 1988 年以来该区中强地震非常活跃,曾发生过 1996 年丽江 7.0 级地震. 2003 年大姚地震后,在周边地震活动显著增强的背景上,由于受汶川地震孕育的影响,出现了近 20 a 来最为显著的平静现象(图 6c).

4 汶川地震的背景空区和孕震空区

4.1 背景空区

图 7 是 1930 年以来四川及其附近  $M \geq 5$  地震震中分布. 由图可见, 1930—1970 年 2 月 24 日龙门山断裂带及其附近  $M \geq 5$  地震比较活跃(图 7a 中的空心圆), 而 1970 年 2 月 25 日—1999 年 9 月 13 日龙门山断裂带及其附近 5 级地震平静 29 a, 为 1930 年以来最为突出的现象(图 7b), 形成了 NE 走向, 长约 400 km 的 5 级地震背景空区(图 7a 中的虚线橢



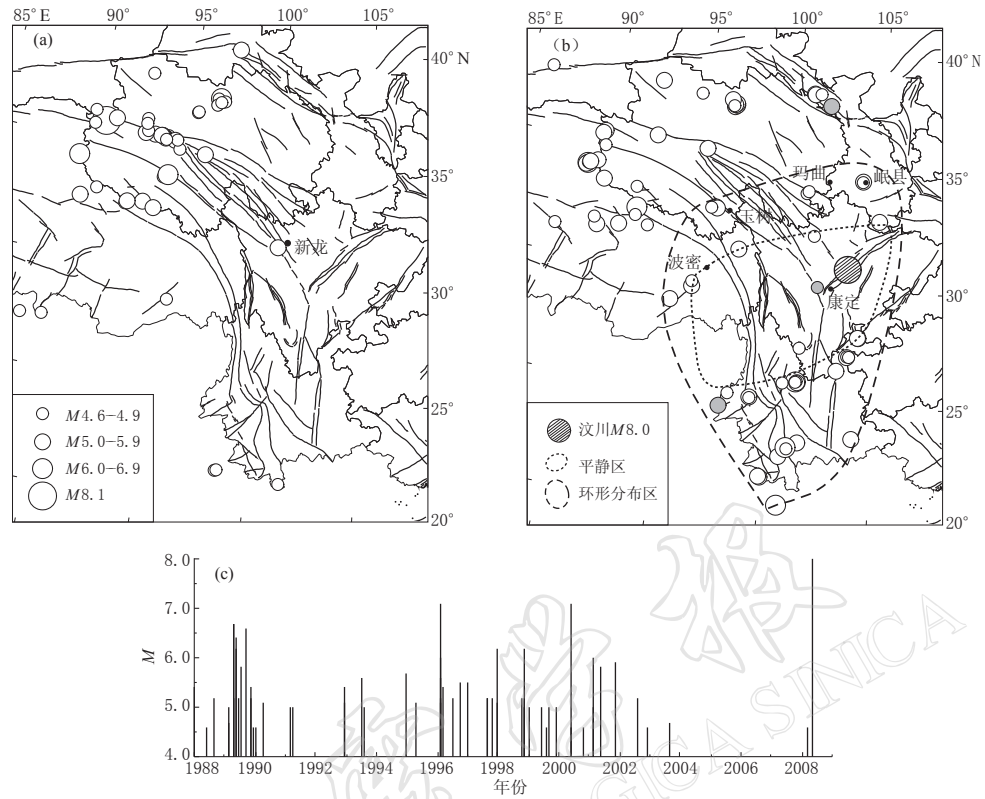


图 6 2003 年大姚地震前(a)后(b)4.6 级以上地震震中分布及 4.6 级地震平静区内近 20 a 来的地震活动  $M-t$  图(c)

图(a)中空心圆表示 2001 年 11 月 14 日—2003 年 7 月 20 日地震；图(b)中空心圆和灰色圆分别表示 2003 年 7 月 21 日—2008 年 2 月 26 日地震及 2008 年 2 月 27 日—2008 年 5 月 11 日地震

Fig. 6 Distribution of earthquakes with  $M \geq 4.6$  before (a) and after (b) the 2003 Dayao earthquake and  $M-t$  chart of earthquakes in the quiescence area in Figure (b) since 1988 (c)

In Figure (a), the hollow circles denote earthquakes during 2001-11-14—2003-07-20.

In Figure (b) the hollow circle and the gray circle denote earthquakes during 2003-07-21—2008-02-26 and 2008-02-27—2008-05-11, respectively

圆). 1999 年 9 月 14 日四川绵竹 5.0 级和 1999 年 11 月 30 日四川安县 5.0 级地震发生在龙门山断裂带上(图 7a 虚线椭圆内的三角形), 其后空区继续平静 8 a 多, 直至发生汶川  $M_s8.0$  地震(图 7a 中的阴影圆).

4.2 孕震空区

图 8a 是汶川地震前四川及其附近不同时段  $M_L \geq 4.0$  地震震中分布图. 由图可见, 2001 年 9 月 1 日—2007 年 3 月 10 日环绕着龙门山断裂带形成了一个 NE 走向的 4 级地震空区. 空区长约 400 余千米, 形成时间为 5.5 a. 正常情况下, 空区内部中等以上地震比较活跃, 汶川地震前 5.5 a 的 4 级地震平静为近 20 a 来最为突出的现象(图 8b).

在空区形成的过程中, 空区外围(将空区扩大 1.3 倍, 去掉空区内部的地区)地震非常活跃, 蠕变曲线从 2004 年开始加速上升, 2007 年至汶川地震前曲线转平(图 8c). 期间发生了甘肃岷县 2003 年 11 月 13 日 5.2 级和 2004 年 9 月 7 日 5.0 级地震, 以及 2006 年 6 月 21 日甘肃文县 5.0 级地震. 引人注目的是四川马尔康震群. 该震群从 2004 年 12 月 14 日



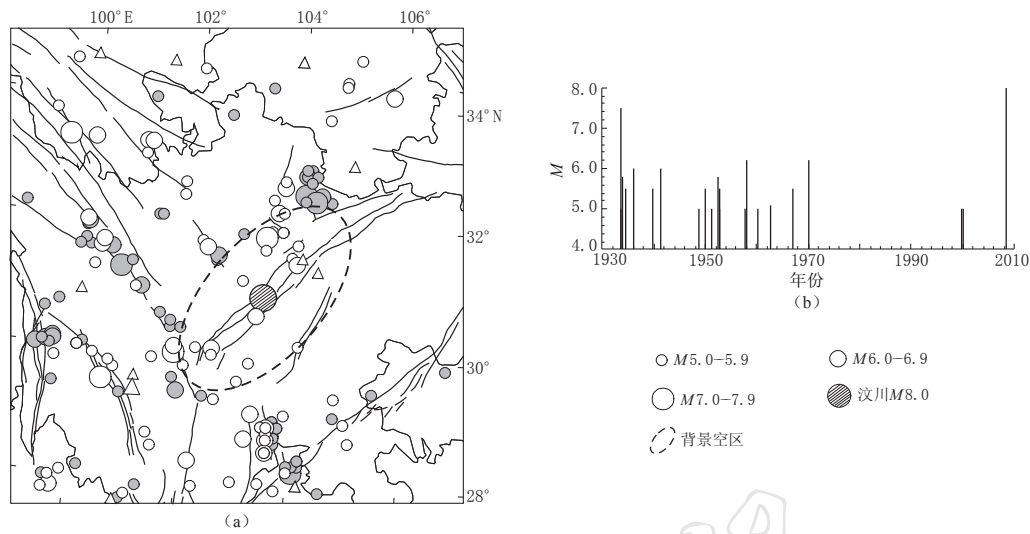
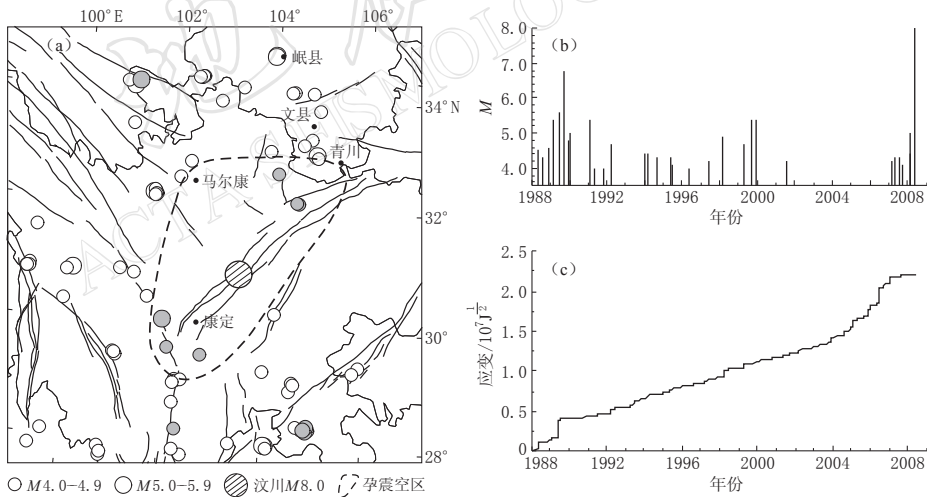


图 7  $M \geq 5$  地震背景空区(a)及背景空区内 1930 年以来地震活动  $M-t$  图(b)

空心圆表示 1930 年 1 月 1 日—1970 年 2 月 24 日地震；灰色圆表示 1970 年 2 月 25 日—1999 年 9 月 13 日地震；三角形表示 1999 年 9 月 14 日—2008 年 5 月 11 日地震

Fig. 7 Seismic gap of  $M \geq 5.0$  earthquakes

(a) Hollow circles, grey circles and triangles denote  $M \geq 5.0$  earthquakes during 1 Jan. 1930 to 24 Feb. 1970, 25 Feb. 1970 to 13 Sep. 1999 and 14 Sep. 1999 to 11 May 2008, respectively; (b)  $M-t$  plot of earthquakes in the seismic gap



○  $M_{L} 4.0-4.9$  ○  $M_{L} 5.0-5.9$  ● 汶川  $M_{L} 8.0$  孕震空区

图 8 汶川地震 4 级地震孕震空区(a)、1988 年以来空区内地震活动  $M-t$  图(b)和空区外围端变曲线(c)

图(a)中空圈表示 2001 年 9 月 1 日—2007 年 3 月 10 日地震；实圈表示 2007 年 3 月 11 日—2008 年 5 月 11 日地震

Fig. 8 Seismogenic gap of the Wenchuan earthquake (a),  $M-t$  plot of earthquakes in the gap since 1988 (b) and strain release for the region around the gap (c)

In Figure (a) hollow circles and solid circles denote earthquakes during 1 Sep. 2001 to 10 Mar. 2007 and 11 Mar 2007 to 11 Mar 2008, respectively

开始活动，至 2007 年 10 月 30 日停止活动，共发生  $M_{L} \geq 2.0$  地震 309 次，其中  $M_{L} 3.0-3.9$  地震 41 次， $M_{L} 4.0-4.9$  地震 5 次，最大地震为 2005 年 1 月 5 日马尔康  $M_{L} 5.0$  地震。

由此看来，该空区为孕震空区(陆远忠等，1982，1983)。

2007 年 3 月 11 日至汶川地震前，空区两端地震活动显著增强，龙门山北段先后发生了 2007 年 3 月 11 日青川  $M_L4.2$ 、9 月 16 日  $M_L4.1$  和 2007 年 4 月 27 日松潘  $M_L4.3$  地震，龙门山断裂带南端与鲜水河断裂带的交汇附近发生了 2007 年 7 月 31 日汉源  $M_L4.3$ 、2008 年 2 月 16 日康定  $M_L4.4$  和 2008 年 2 月 27 日康定  $M_L5.0$  地震(图 8a 虚线椭圆内的三角形)。这些地震的相继发生致使空区缩小，具有“逼近地震”的性质，是强震孕育到中短期阶段的标志(陆远忠等，1982，1983)。

5 汶川地震前中小地震活动特征

5.1 震群活动时空特征

据姜秀娥和陈非比(1983)以及薛艳和梅世蓉(1999)的研究，在特大地震孕育的后期将出现显著的震群活动。为了研究汶川地震前的震群活动特点，挑选了 2002 年至汶川地震前青藏块体的震群，挑选震群的原则与薛艳和梅世蓉(1999)研究唐山地震前后震群活动特点时的判定标准基本相同，只是考虑到该地区的特点，限定震群活动峰值日至少要发生 3 次以上  $M_L\geq3.0$  地震。

按照上述标准，2002—2008 年 5 月 11 日青藏块体共发生 55 次 3 级以上震群，其中 83.6% 的震群分布在南北带中南段。图 9a 是 2003 年 7 月 21 日云南大姚地震后震群的空间分布。由图 9a 可见，震群的空间分布非常不均匀，主要集中在 4.6 级地震平静区(图 6b)的边缘。其中滇西至川滇交界东部最为集中，且呈 NE 向条带展布。显著的震群事件有 2003 年 11 月 15 日云南鲁甸 5.1 级、2005 年 8 月 5 日云南会泽 5.3 级和 2006 年 7 月 22 日云南盐津 5.1 级震群等。其次，甘青川交界地区震群活动也较为显著，最为突出的是 2005 年 1 月 5 日四川马尔康  $M_L5.0$  震群。

由图 9a 还可以看出，在 4.6 级地震平静区内还形成了一个震群包围的空区，汶川地震就发生在该空区的边缘。震群空区内 2003 年 7 月 21 日—2006 年底仅发生 1 次康定  $M_L3.3$  震群，而 2007 年空区内发生了康定  $M_L4.1$  和新龙  $M_L3.1$  震群，2008 年 2 月 14 日在空区边缘龙门山断裂带上发生了紫坪铺水库区  $M_L3.8$  震群，距离汶川地震震中约 20 km。这表明，越靠近主震发生，随着区域应力场的

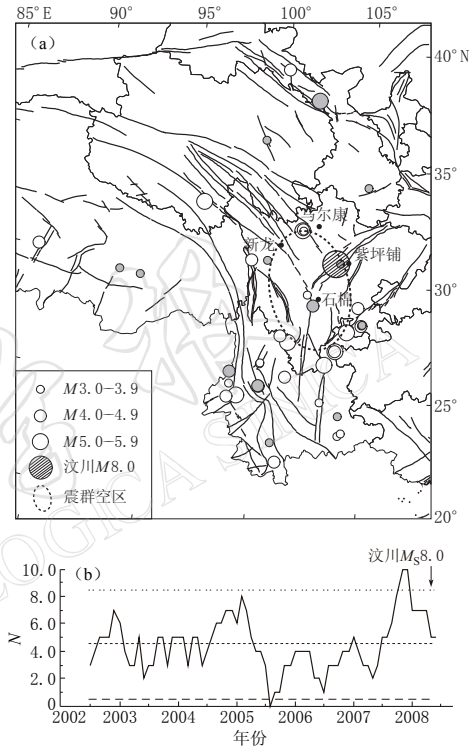


图 9 青藏块体震群空间分布(a)与频度曲线(b)

图(a)中空圈表示 2003 年 7 月 21 日—2006 年 12 月 31 日的震群，灰色圈表示 2007 年 1 月 1 日—2008 年 5 月 11 日的震群；图(b)中频度曲线为 6 个月窗长，1 个月滑动

Fig. 9 Distribution of earthquake swarms in Qinghai-Xizang block (a) and variation of swarm frequency with time (b). In Figure (a), hollow circles and grey circles denote earthquakes during 2003-07-21—2006-12-31 and 2007-01-01—2008-05-11, respectively. The sliding window is six-month long and the sliding step is one-month long for Figure (b)

逐渐增强，主震周围的震群活动有增多的迹象。

图 9b 为 2002 年以来青藏块体震群频度曲线(6 个月窗长, 1 个月滑动). 该图显示, 青藏块体平均每半年发生 4.5 次震群. 2002 年至汶川地震前共出现 3 次震群频度高值现象, 第一次为 2002 年 11 月, 最高频度为 7 次, 这可能与 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后的调整活动有关; 第二次为 2005 年 1 月, 最高频度达 8 次, 主要是由于 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊  $M_w9.0$  地震触发的云南地区小震群活动造成的; 第三次高值出现在 2007 年 11—12 月, 最大频度为 10 次, 期间中国大陆及邻区没有发生大地震, 异常结束后 4 个余月发生汶川地震. 与前两次高频度相比, 汶川地震前的震群活动最为突出.

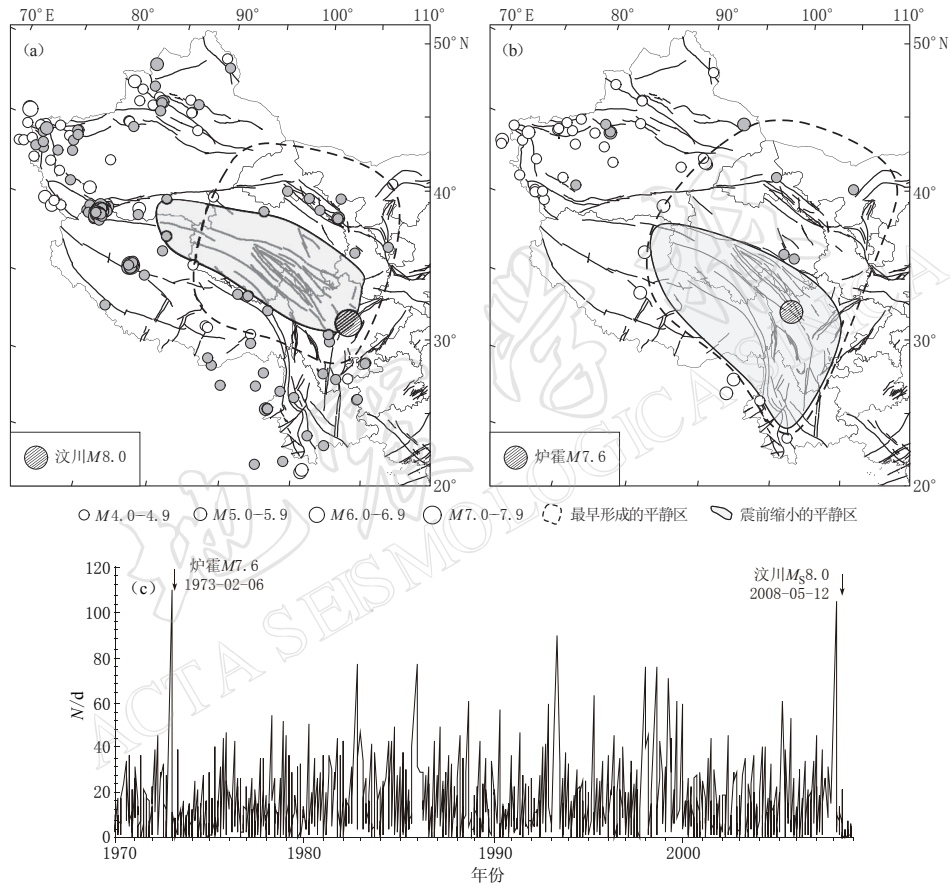


图 10 汶川地震前(a)和炉霍地震前(b)青藏块体  $M_L \geq 4.0$  地震震中分布及青藏块体中北部(图(a)中虚线所示的区域)4 级以上地震时间间隔统计(c)

(a) 空心圆表示 2007 年 10 月 2 日—2008 年 1 月 12 日发生的地震, 灰色圆表示 2008 年 1 月 13 日—2008 年 5 月 11 日发生的地震; (b) 空心圆表示 1972 年 10 月 2 日—1973 年 1 月 17 日发生的地震, 灰色圆表示 1973 年 1 月 18 日—1973 年 2 月 5 日发生的地震

Fig. 10 Distribution of  $M_L \geq 4.0$  earthquakes in Qinghai-Xizang block and its vicinity before Wenchuan earthquake (a) and before Luhuo earthquake (b) as well as the variation of time interval of earthquakes in the dashed circle area of Figure (a) with time (c). In Figure (a), hollow circles and gray circles denote earthquakes during 2007-10-02—2008-01-12 and 2008-01-13—2008-05-11, respectively; in Figure (b) hollow circles and gray circles denote earthquakes during 1972-10-02—1973-01-17 and 1973-01-18—1973-02-05, respectively

## 5.2 汶川地震前短期阶段中小震活动特点

2007 年 10 月 2 日—2008 年 1 月 12 日青藏块体大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静 103 d(图 10a), 为 1970 年以来第二长平静(图 10c). 2008 年 1 月 13 日以后, 平静区逐渐解体, 至汶川地震前 4 级地震平静范围缩小到巴颜喀拉地块区, 汶川地震就发生在巴颜喀拉地块的东边界带上(图 10a).

1970 年以来青藏块体中北部地区(图 10a 中的虚线区域)100 天以上的平静现象仅出现 2 次, 除了汶川地震前的平静现象外, 另一次为 1972 年 10 月 2 日—1973 年 1 月 17 日, 平静了 107 d, 平静打破后 19 d, 原平静区北部发生多次地震, 但川滇菱形地块及其附近仍平静, 1973 年 2 月 6 日四川炉霍 7.6 级地震就发生在川滇菱形地块的东北边界带上(图 10b).

通过对比可以看出, 1973 年炉霍与汶川地震前青藏块体都出现大范围的 4 级地震平静, 且平静区范围与平静时间都相当. 平静打破后, 原平静区逐渐缩小, 大致缩小到大地震所处的活动地块附近.

图 11 是 2008 年 1 月 22 日至汶川地震前龙门山地震带及其附近  $M_L \geq 3.0$  地震震中分布, 可以看出, 从四川荣县, 经都江堰, 至四川红原形成一个 NNW 走向的 3 级地震条带, 条带长约 400 km, 带上共发生 3 级地震 8 次, 最大为 2008 年 2 月 28 日都江堰紫坪铺水库区 3.8 级震群, 正常情况下, 四川地区小震空间分布比较分散, 图 11 所示 NW 走向与龙门山断裂带斜交的 3 级地震条带是很少见的.

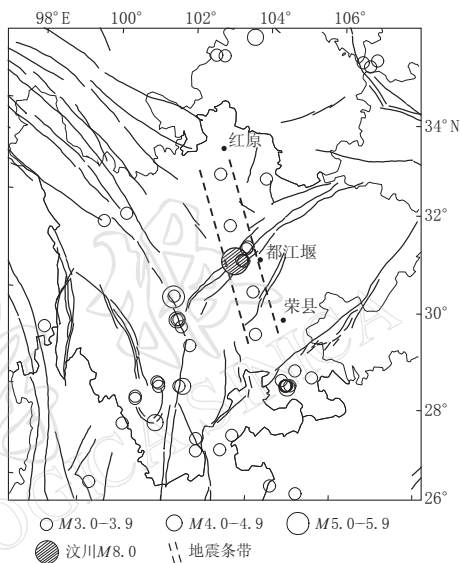


图 11 龙门山地震带及其附近  $M_L \geq 3.0$  地震震中分布(2008 年 1 月 22 日—5 月 11 日)

Fig. 11 Distribution of  $M_L \geq 3.0$  earthquakes in Longmenshan seismic belt and its vicinity

## 6 讨论与结论

通过系统分析, 汶川地震前不同强度的地震在不同范围、不同时段出现了多项地震活动异常, 它们对特大地震的预测具有一定的指示意义:

1) 2001 年以来大三角地区进入 7.8 级以上大震活跃时段, 而中国大陆地区 2001 年昆仑山口西地震后地震活动水平逐渐降低, 至 2007 年已经达到了最低点, 相继出现了 7 级地震平静 6 年半、6 级地震平静 756 d、2007 年的 5 级地震低频度和 172 d 的显著平静现象. 这些是汶川地震前中国大陆出现的显著异常.

2) 南北地震带 1996 年云南丽江地震后 7 级以上地震平静近 12 a, 有可能开始一个新的活跃期. 历史震例显示, 活跃期首发强震震级比较大. 空间上南北带 7 级地震具有从南向北推进的特点. 汶川地震的发生完全符合历史地震规律, 预示该区已经开始了一个新的活跃期.

3) 1988 年以来中国大陆 7 级地震分布显示, 南北地震带中段出现 7 级地震空段, 汶川地震就发生该空段内.

4) 2003 年云南大姚 6.2 级地震开始至汶川地震前南北带 5 级左右地震活动显著增强, 在中、南段形成 4.6 级以上地震的环形分布, 环内四川大部分地区及川、滇、藏交界地区异常平静. 震前两个多月, 平静区内发生康定 4.6 级地震. 同期, 南北带中、南段震群活动也非常显著, 且时空分布显示出明显的非均匀性. 空间上, 震群活动主要集中在滇西至川滇交界东部, 呈 NE 向条带展布, 且在 4.6 级地震平静内形成震群空区, 汶川地震就发生在震群空区的边缘. 大震前 8 个月, 南北带中、南段出现了超过 2 倍均方差的震群高频度异常, 结束后 4 个月发震.

5) 龙门山断裂带有记录以来没有发生过 7 级地震. 汶川地震前 38 a, 龙门山断裂带及其附近形成 5 级地震背景空区; 震前 6.5 a, 环绕着龙门山断裂带形成一个 NE 走向、长约 400 余千米的  $M_L \geq 4.0$  地震孕震空区. 震前 1 a 孕震空区内部及其两端相继发生多次 4 级地震, 空区缩小.

6) 汶川地震前 7 个月, 青藏块体大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静 103 d, 2008 年 1 月 13 日以后平静区逐渐解体, 至汶川地震前 4 级地震平静区缩小到巴颜喀拉地块, 汶川地震就发生在巴颜喀拉地块的东边界带上. 汶川地震前 3 个多月, 孕震空区内部出现了一条从荣县, 经都江堰, 至红原的 3 级地震条带, 与龙门山断裂带斜交, 带上紫坪铺水库区于 2008 年 2 月 14 日发生了少见的小震群活动.

以上分析表明, 汶川地震前不同时空范围出现了一系列的异常现象. 大多数异常在日常震情跟踪工作中已经注意到了, 但却给出了错误的判断, 究其原因主要有以下几点: ① 在中国大陆地区 7 级地震平静 6 年半、6 级地震也出现 756 d 超长平静的背景上, 认为中国大陆目前处于相对平静时段, 地震活动是逐渐增强的过程(中国地震台网中心, 2007). 而在短短的 5 个月内相继发生了 2008 年 1 月 9 日西藏改则 6.9 级、3 月 21 日新疆于田 7.3 级和 5 月 12 日汶川 8.0 级地震, 如此快的增强活动完全出乎意料; ② 对龙门山断裂带大震危险性认识不足, 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后, 对南北带中段发生强震的危险性有所认识, 龙门山断裂带虽然是巴颜喀拉块体的东边界带, 但由于其历史上没有发生过 7 级地震, 地震活动水平比较低, 所以对该带发生强震的危险性估计不足, 在这种背景下, 在震情跟踪过程中将出现的异常一般都归结到甘青川—青川藏交界地区.

由于上述原因, 对 2003 年以来四川大部分地区的大范围平静认识不足, 没有综合考虑甘青川交界及川滇交界地区的地震活动增强和多种前兆异常, 而是分别考虑成两个地震危险区.

本文分析显示, 特大地震与经常遇到的中强地震不同, 其孕育、发生涉及的时空尺度都很大, 即在空间上涉及数千至数百千米的区域, 时间上至少持续数十年至数年至数月. 震中及其附近很大范围在较长时间是以地震相对平静为特征, 靠近震中地区的中小地震活动异常在震前 1 a 才开始逐渐显示, 震前短期阶段仅表现为 4 级地震大范围平静和 3 级地震条带. 因此, 如果没有正确的地震趋势判断, 很难给出正确的短期预测. 因此, 在今后的地震预测研究工作中, 如何给出正确的地震大形势判定, 如何将长、中、短、临跟踪相结合, 如何综合分析各种异常现象是一个值得深入思考和研究的问题.

地震形势判定中最重要的是活跃期与平静期的判断. 一个区域无论大小, 应有活跃与平静的划分, 但活跃期与平静期的判别标准在不同时间段也可能不同. 以往地震预报研究中我国大陆均以 7 级地震为指标, 且在实际工作中产生较大作用, 但这明显有人为设定因

素. 根据实际活动状态划分活跃与平静可能更为合理. 20 世纪 60 年代、70 年代无疑是一个地震活跃期, 期间发生了通海 7.8 和唐山 7.8 级地震, 但主体活动水平是 7 级地震. 如果从 8 级左右大震看, 该时段并不活跃. 因此今后活跃期划分可能还需对其活动水平进行判定.

第二类空区是指未来强震区域出现的低级别地震的平静现象. 背景空区与孕震空区最本质区别是震级、时间尺度的差别. 本文提出的汶川地震前 38 a 的 5 级地震背景空区和 6.5 a 的 4 级地震的孕震空区, 是符合上述定义的. 但与陆远忠等(1982, 1983)的研究结果有一定差别. 这是汶川 8 级地震的特有现象, 还是 8 级大震的共性特征, 有待今后深入研究.

本文是汶川地震科学总结与反思报告(地震预报领域)的研究内容, 在准备过程中得到了许多专家的建议和帮助; 审稿人对初稿提出了极富价值的审稿意见. 作者在此表示诚挚的谢意!

## 参 考 文 献

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地质前缘, **10**(特刊): 66–73.
- 傅征祥, 金学申, 邵辉成, 丁香. 2005. 中国大陆强地震成组活动迁移及其机理分析[J]. 地震, **25**(4): 65–74.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—1911 年)[J]. 北京: 地震出版社: 1–514.
- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 1994. 中国大陆地震资料完整性研究之二: 分区地震资料基本完整的起始年分布图象[J]. 地震学报, **16**(4): 423–432.
- 姜秀娥, 陈非比. 1983. 区域震群与唐山大震[J]. 地震学报, **5**(2): 146–156.
- 李钦祖, 于利民, 王吉易, 万迪埏, 陈绍绪. 1993. 中国大陆强地震的成组活动和概率预报[J]. 中国科学: B 辑, **23**(5): 519–526.
- 李钦祖, 于立民, 王吉易, 万迪埏, 陈绍绪. 1994. 成组活动是中国大陆强地震的一个基本特点[J]. 地震学报, **6**(1): 1–17.
- 陆远忠, 沈建文, 宋俊高. 1982. 孕震空区与逼近地震[J]. 地震学报, **4**(4): 327–336.
- 陆远忠, 王炜, 沈建文. 1983. 孕震空区与逼近地震(续)[J]. 地震学报, **5**(2): 129–144.
- 梅世蓉. 1960. 中国的地震活动性[J]. 地球物理学报, **9**(1): 1–19.
- 梅世蓉, 宋志平, 薛艳. 1996. 中国巨大地震前地震活动环形分布图象与规律[J]. 地震学报, **18**(4): 413–419.
- 王俊国, 王林瑛, 吴晓芝, 陈佩燕, 白彤霞, 何巧云. 2004. 华北地区强震前的信号震及其预测意义[J]. 地震, **24**(3): 51–60.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, **27**(3): 446–461.
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 于桂华. 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义[J]. 中国科学, **38**(5): 529–542.
- 薛艳, 梅世蓉. 1999. 唐山大震前一般震群与前兆震群时空演化特征研究[J]. 地震, **19**(2): 184–189.
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 周成虎, 陈运泰. 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: D 辑, **38**(10): 1186–1194.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉勇康. 2008. 汶川 8.0 级地震发震断裂带的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, **51**(4): 1066–1073.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D 辑, **33**(增刊): 12–20.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年  $M_s \geq 4.7$ )[M]. 北京: 中国科学技术出版社: 1–637.
- 中国地震台网中心. 2007. 2008 年度我国地震趋势研究报告: 中国地震趋势预测研究(2008 年度)[M]. 北京: 地震出版社: 1–121.
- Densemoe A L, Ellis M, Li Y. 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, **26**: TC4005, doi:10.1029/2006TC001987.